中華農業研究 (Jour. Agric. Res. China) 32(2)：172～184 (1983)

磷素肥料在土壤中的變化聚積及其被旱作利用之研究[1]

李 子 純[2]

摘要：本研究係於溫室進行，將多量磷肥 (500 ppm P) 分四次同時施入本省十二種不同土壤中，每次施入後，即經浸水、風乾處理約一個月，以摸擬田間情況。四次共歷時五個月。處理過的土壤(每土壤均包括一不施磷之對照) 再進行 Neubauer 法磷效應試驗，種植作物爲小麥。目的爲探討及比較原土壤中磷素與施肥磷素之聚積型態；化學測定法有效磷值與眞正有效磷值間之關係，及施肥聚積磷素之回收率。其結果摘述如下：

1. 原土壤中之磷幾乎全以Fe-P及Ca-P型態存在，前者在十二土壤中平均佔53.2%，後者佔44.8%，而以Al-P型態存在者僅佔三者總量之1.9%。在施用多量磷肥 (500 ppm P)後之土壤中Al-P所佔的百分率升高爲42.8% (十二土壤平均)，Ca-P 減低爲 17.6%，Fe-P 減低爲 41.3%。又本試驗資料顯示施用磷肥 500 ppm P 後土壤中的磷絕大部分 (84%) 以 Al-P 及 Fe-P 型態存在，二者之比約爲 1 ：1 。
2. 施肥聚積磷素之回收率 (以 Bray's P-1 法測定者) 在 13.8% 至 62.2% 之間，十二土壤平均爲35.5%。回收率之高低與土壤之 CEC, P Sorption 及 O. M. 含量成顯著負相關關係，而與有效磷含量成顯著正相關關係，如以土壤之 CEC, P Sorption 及 Bray's P 三者共同估計磷素回收率，其準確性可達78%。
3. 作物磷吸收量與土壤 Bray 或 Olsen 磷均有極顯著之相關關係，其相關係數依次爲 0.853** 及 0.866**；但與 EUF 法測得磷之相關關係則較差。以上結果顯示以 Bray 或 Olsen 法測得之土壤有效磷可有效代表土壤中可被作物吸收利用之磷含量，無論此磷肥係過去或新近施用者。又本研究資料顯示作物吸收之磷在原土壤中多爲 Fe-P，施肥土壤中則多爲 Al-P。

通常施於土壤中的磷肥僅 5 —25% 爲當期作物所吸收，其餘均殘留土壤 (6,10,21)。磷爲在土壤中不易移動的養分，受淋失的機會較少，因之連年施用後，必有多量磷肥殘留於土壤。

磷肥施於土壤後，在酸性土壤中多與 Al 及 Fe 結合；在鹼性土壤中多與 Ca 結合而形成各種不同型態而溶解度低的磷化合物，即通常所謂「磷的固定」，意即固定的磷不易再被作物吸收利用。但事實上，在很多土壤中，此種「固定的磷」仍能大量供給作物所需的磷，而成爲土壤中一大磷的資源。

據英國 Rothamsted 所作長期磷肥試驗的資料 (9)：在每年施用 22 lb P_2O_5/acre 的磷肥，連續施用 100 年後停施，而停施十二年時仍有明顯磷肥的殘效。

Ensminger (13) 在美國 Alabama 州所作磷肥殘效試驗顯示：當連續四年，每年施用 120、90、60 及 30 lb P_2O_5/acre 的磷肥，其後即停施，而於停施後十五年棉花產量仍與過去磷肥施用量成正比。

---

1. 臺灣省農業試驗所　研究報告第1094號。
2. 本所農化系副研究員。臺灣省　臺中縣　霧峰鄉。

另一在美國 North Carolina 州高磷固定力的 Georgeville 土壤中所作試驗也顯示磷肥施用九年後，仍有明顯殘效[10]。

由於能源問題的漸被重視，有關磷肥殘效的研究近年在歐美各國所作研究甚多[4,11,12,16,23]。本省在磷肥殘效方面之研究工作尙未開始，累積磷肥在不同土壤中的有效度及其施入土壤後的變化等均爲需待研究的問題。本研究的目的即在探知累積施用磷肥對土壤磷有效指數及施磷效應的影響及磷肥施入土壤後，在土壤中之結合型態及變化。又電透法（Electro-ultra-filtration）經 Nemeth[17] 改進後，已爲近年來許多國家競相研究的土壤有效養分測定方法，本研究中土壤有效磷含量的測定，也包括 EUF 法，以與其他慣用方法比較。

材料與方法

一、土壤：共十二種，採自全省各地包括多種土類，其有效磷含量由極低至極高。各土壤所屬之類別，母質及採取地點列於表 1 。（此等土壤係1968年採自全省，故在試驗前之十四年內未再施肥）。

表1. 試驗用土壤之土類、母質及其採取地點

Table 1. Soil group, parent material, and sampling location of the soils used

土號 Soil No.	土類 Soil group	母質 Parent material	採取地點 Sampling location
1	紅棕壤	洪積層	桃園中壢上青埔田27—7
2	冲積土	洪積層、砂頁岩、粘板岩混合	臺中清水社口田79—148
3	冲積土	砂頁岩	臺中神崗大社田410
4	冲積土	粘板岩（新濁水溪冲積）	彰化埤頭周厝崙段379—303
5	臺灣粘土	砂頁岩	臺南新營王公廟電信大樓後
6	冲積土	砂頁岩	臺南六甲龜子港段129之 9
7	風積土	砂頁岩	臺南市結核病院對面
8	冲積土	粘板岩新冲積土	屏東佳東田258
9	冲積土	南部砂頁岩	屏東恆春車城鄉新街圖298
10	冲積土		
11	東海岸冲積土	砂頁岩混合火成岩	臺東東河
12	黑土	火成岩	臺東長濱

二、土壤性質分析：

（一）一般性質：包括土壤 pH，有機質、陽離子交換能量，交換性 Ca、Mg、K，及機械分析等均依本省現行採用之方法[1]，全氮則以 Kjeldahl 氏法分解後，以 Sodium hypochlorite 法比色測定。交換性 Al 用 Coleman 氏法[7]，活性鐵用 Asami & Kumada 氏法[5]，本試驗所用土壤之一般性質列於表 2 。

（二）有效磷：共用三種方法測定。

1. Bray's p-1 法：以 0.025N HCl−0.03N NH_4F 抽出。
2. Olsen氏法：以 pH 8.5, 0.5 M $NaHCO_3$ 抽出。
3. 電透法（Electro-ultra-filtration 或 EUF）：又分以室溫，200 V 抽取 30 分鐘之

Available P 及以 80°C, 400V 抽取5分鐘之 P reserve 兩部分 [17]。

（三）無機磷型態測定：用修正的 Chang & Jackson 氏法 [19]，唯各型態磷抽出後改以 L-ascorbic acid 法比色測定。本試驗中僅測定 Al-P, Fe-P 及 Ca-P 三種。

表 2. 試驗用土壤性質

Table 2. Some chemical properties of the soils used in this experiment

Soil No.	pH	O. M. %	Total N %	CEC	Exchangeable K (meq/100)	Exchangeable Ca (meq/100)	Exchangeable Mg (meq/100)	Ex. Al ppm	Free Fe_2O_3 %	% Clay	% Silt	% Sand	Texture
1	5.7	2.02	0.10	8.30	0.52	3.14	1.27	52	2.48	35.96	52.30	11.74	SiCL
2	6.7	2.78	0.16	12.84	0.14	5.75	3.89	0	1.17	19.96	56.30	23.74	SiL
3	5.1	2.17	0.12	7.67	0.31	2.97	1.27	238	0.58	21.96	56.30	21.74	SiL
4	6.0	2.02	0.11	4.50	0.12	3.29	1.30	0	1.54	11.96	32.30	55.74	SiL
5	8.2	2.39	0.13	18.87	0.45	10.97	6.48	0	2.17	39.96	54.30	5.74	SiCL
6	7.0	1.20	0.06	8.83	0.31	4.25	3.64	0	1.77	20.96	55.30	23.74	SiL
7	5.8	0.51	0.01	2.29	0.10	1.58	0.16	138	1.23	3.63	6.30	89.74	LS
8	7.5	3.22	0.25	14.31	0.17	10.98	5.26	0	1.89	31.96	58.30	9.74	SiCL
9	6.6	2.24	0.10	9.43	0.19	3.77	3.14	0	1.62	17.96	52.30	29.74	SiL
10	5.5	2.09	0.08	9.11	0.31	2.23	0.34	809	3.19	38.96	43.30	17.74	SiCL
11	5.9	4.41	0.15	28.36	0.43	12.22	8.63	11	1.11	25.18	53.94	20.88	SiL
12	5.8	4.41	0.16	32.36	0.41	13.77	12.46	0	1.32	33.18	39.94	26.88	CL

（四）磷吸着係數：稱土壤 2.5 克置於 50 ml 塑膠離心管中，加 25 ml 500 ppm P 溶液（溶於 0.01 M $CaCl_2$ 中），及甲苯二滴，以橡皮塞塞緊，置於搖動機上，搖動30分鐘後，置於 30 °C 之保溫箱內，保溫九天，每日取出予以搖動 30分鐘，九天後取出搖動 30 分鐘後，離心，取澄清液以鉬黃法比色，測定土壤吸着磷的量 [14]。

三、磷聚積處理：將多量磷肥，分數次加入土壤，並經乾濕處理，以摸擬田間情況。

（一）加磷處理：各土壤於風乾磨碎後，分盛於盆栽試盆中，每盆盛土三公斤，在土壤中先加入 $Ca(H_2PO_4)_2$ 200 ppm P，隨即浸水碎土，繼之任其風乾，乾後（約需一個月）再加入 100 ppm P，浸水碎土，風乾。如此再重複三次，共加入磷酸一鈣 500 ppm P。自 70年12月 9 日開始第一次加入磷肥浸水，至71年 5 月10日全部處理完畢，共歷時五個月。

（二）原土對照：各土壤均有一對照處理，除不施磷肥外，其他浸水，碎土，風乾等均與加磷處理者同時進行。

（三）前述經（一）、（二）處理過的土壤再進行有效磷、無機磷型態及磷吸着係數測定。

四、Neubauer 法磷效應試驗：稱乾土100克，加石英砂（經 3 N HCl 洗淨者）50克，置於直徑11公分高 7 公分之棕色玻璃皿中，加水潤濕，每盆加 75 mg $(NH_4)_2SO_4$ 及 60 mg KNO_3，磷肥則用 $Ca(H_2PO_4)_2$，分 P_0（不施），P_1（30ppm P），及 P_2（60 ppm P）三等級施入。土壤經壓平後，上舖石英砂100克，再加水潤濕，用特製之打孔板將上層濕砂打成分佈均勻之 91 孔，將小麥播於各孔中，壓實，上再舖石英砂50克。12種土壤 × 2 種前處理 × 3 等級磷處理 × 4 重複，共計240盆，植於溫室。

五、作物磷吸收量測定：前述 Neubauer 試驗中種植之小麥，收割時從砂層表面剪下，經烘乾（75

—80°C）後記錄其重量，再經磨細，以濃硫酸及 H_2O_2 分解後，用鉬黃法測定其含磷量，再計算各土壤及各處理之磷吸收量。

結果與討論

一、原土壤中磷素與施肥磷素之聚積型態：

（一）原土壤中磷素之聚積型態：表3顯示原土壤（未施用磷肥土壤）中之磷幾乎全以 Fe-P 及 Ca-P 存在。前者在十二土壤中平均佔 53.2%；後者佔 44.8%，而以 Al-P 型態存在者僅佔三者總量之1.9%。

表3. 原土壤中磷素與施肥磷素之聚積型態

Table 3. Comparison of inorganic forms of soil P in soils with and without P accumulation treatment.

土號 Soil No.	處理 Treatment	Al-P		Fe-P		Ca-P		Total Al-P+Fe-P+Ca-P
		P ppm	%	P ppm	%	P ppm	%	
1	O	2.7	1.62	140	83.98	24	14.40	167
	P	342	86.28	134	26.59	28	5.56	504
2	O	1.8	0.58	230	74.92	75	24.43	307
	P	209	25.15	520	62.58	102	12.27	831
3	O	4.3	1.54	190	68.10	85	30.47	279
	P	442	52.49	300	35.63	100	11.88	842
4	O	4.1	1.45	68	24.11	210	74.47	282
	P	327	36.45	130	14.49	440	49.05	897
5	O	3.4	1.48	97	42.17	130	56.52	230
	P	247	38.00	300	46.15	103	15.85	650
6	O	3.4	3.95	60	69.77	22	25.58	86
	P	224	46.00	235	48.25	28	5.75	487
7	O	4.0	1.27	80	25.48	230	73.25	314
	P	280	42.42	160	24.24	220	33.33	660
8	O	3.7	1.69	55	25.11	160	73.01	219
	P	231	40.46	200	35.03	140	24.52	571
9	O	4.3	2.15	60	30.00	136	68.00	200
	P	180	25.42	390	55.08	138	19.49	708
10	O	4.5	4.02	77	68.75	30	26.79	112
	P	311	54.09	230	40.00	34	5.91	575
11	O	2.3	1.08	100	47.17	110	51.89	212
	P	225	30.00	330	50.67	145	19.33	750
12	O	1.9	1.51	100	79.37	24	19.05	126
	P	195	35.26	315	56.96	43	7.78	553
Average	O	3.4	1.86	105	53.20	103	44.83	211
	P	268	42.67	275	41.31	127	17.56	669

Peterson[19] 曾以美國 Wisconsin 州的各種不同土類，其中包括酸性土壤，作土壤中P-fractionation 測定，資料中也以 Al-P 所佔百分率最低，Fe-P 與 Ca-P 含量較高，唯 Al-P 與 Fe-P 及 Ca-P 間的差不若本試驗中土壤大。

張氏 [8] 也認爲任何土壤（新施磷肥者例外）中的磷以 Al-P 型態存在者必遠低於 Fe-P 及 Ca-P。

林氏 [3] 曾以本省主要土類作土壤樣本乾燥程度對於磷鉀有效指數的影響，試驗中也曾分析各土壤中不同型態磷，其風乾土壤中 Al-P 平均佔三者總量之 9.5% ；Fe-P 佔 29.9%；Ca-P 佔 60.6%。

本試驗中未施磷肥處理之土壤所含 Al-P 平均僅佔三種型態磷的 1.9%，較前述研究資料所佔百分率均低，或係由於此等土壤在試驗前之十餘年中均未再行施用磷肥（所用土壤係1968年採自全省，此後即以大桶貯於本所網室中），而土壤中無機型態磷仍在繼續緩慢轉變中。

（二）施肥磷素之聚積型態：表 3 顯示經多量磷肥（500 ppm P）處理後之土壤中，大部分的磷係以 Al-P 型態存在，其次爲 Fe-P，而以 Ca-P 型態存在者極少。如以三者所佔百分率而言，則施磷處理後之土壤，Al-P 所佔的百分率躍居三者之首，而佔 42.8% （十二土壤平均値）；Ca-P 則由原土壤的 44.8% 減低爲 17.6%；Fe-P 由原佔的 53.2% 減爲 41.3%。

張氏[8] 在其對土壤有效磷化學之研究中，也發現磷肥施入土壤後，多被固定爲 Al-p，其後此 Al-P 即漸轉變爲 Fe-P 及 Ca-P。

Shelton 氏等[20] 之試驗資料也顯示施入土壤中的磷肥多以 Al-P 型態存在。

又據 Yost 等[23] 以 Central Brazil 的土壤所作之試驗資料顯示，施肥量低時（50 kg p/ha), Fe-P 高於 Al-P（由於 Fe 化合物較易與磷結合），但當施肥量高時(560 kg p/ha），初期 Al-P 含量也高於 Fe-P 及 Ca-P，其後 Al-P 即逐漸轉變爲 Fe-P。且施入土壤中之磷肥量愈高，其 Al-P/Fe-P 之比例即愈高，當施用量爲 856kg p/ha 時，施用12天後之 Al-P/Fe-P 比爲1.1，但施用30天後此比例即降低爲 0.75。30天以後的變化即很緩慢。

本試驗資料顯示施用磷肥 500 ppm P 或 1,250 kg p/ha 後土壤中的磷絕大部分（84%）呈 Al-P 及 Fe-P 型態存在，二者之比約爲 1 ： 1。

二、施肥聚積磷素之回收率：

（一）磷素之回收率：此處所稱之回收率係指經施用 $Ca(H_2PO_4)_2$ 500 ppm P 處理後之土壤以化學測定法測得有效磷增加量所佔原施入量的百分率。

表 4 爲各土壤未經施磷及施用磷肥 500 ppm P 後有效磷含量（Bray's p-1 及Olsen 氏兩法測値）及各土壤之磷肥回收率。

以 Bray's p-1 法測得之有效磷回收率在 13.8至 62.2% 之間，平均爲 35.5%；以 Olsen 氏法測得者回收率在12.2%至62.4%之間，平均爲32.5%，兩法之平均極爲接近。如以 Bray's p-1 法測値而言，磷回收率自 13.8% 至 62.2% ，也即欲提高土壤有效磷 1 ppm，需施磷肥 2 至 7 ppm，或平均提高有效磷測値 1 ppm，需施用磷肥 3 ppm。Peck[18] 氏等曾以田間試驗及實驗室保溫（22 °C）培養試驗探求施用磷肥後 Bray's p-1 土壤磷測定値的變化，其田間試驗結果爲欲提高磷測定値 1 ppm，需施用磷 4 ppm；其保溫培養所用土壤種類較多，保溫期間爲 49 星期 ， 結果爲欲提高 Bray's p-1 磷測値 1 ppm，需施用磷 2-10 ppm，該試驗中保溫培養所用土壤爲過去未施用過磷肥者，試驗進行時磷肥施用後，土壤保溫期間，曾於不同期間取出土壤，以 Bray's p-1 法測定其有

表 4. 試驗用土壤之磷素回收率及磷吸着係數

Table 4. P recovery rate and P sorption of the experimental soils

土 號 Soil No.	處 理 Treatment	Bray's P P ppm	Bray's P Recovery rate %	Olsen's P P ppm	Olsen's P Recovery rate %	P Sorption P_2O_5 mg/100g soil
1	O	16	40.8*	6	30.0	381
	P	220		156		295
2	O	32	25.6	21	19.8	497
	P	160		120		375
3	O	65	61.0	40	62.4	206
	P	370		352		135
4	O	29	62.2	13	32.6	140
	P	340		176		72
5	O	16	26.8	10	34.6	551
	P	150		183		452
6	O	8	37.4	3	30.0	251
	P	195		153		188
7	O	62	49.6	27	45.8	271
	P	310		256		197
8	O	11	31.8	4	35.2	450
	P	170		180		443
9	O	7	23.6	7	12.2	272
	P	125		68		268
10	O	17	38.6	5	33.0	461
	P	210		170		438
11	O	8	13.8	10	24.0	409
	P	77		130		402
1	O	7	14.8	7	29.8	410
	P	81		156		436
Average	O	18	35.5	13	32.5	358
	P	201		175		308

* $\frac{220-16}{500}\times 100—40.8\%$

效磷的變化，直至49星期爲止，各土壤測定值的變化在16星期後幾乎均已穩定。

Griffin & Hanna[15] 爲求美國 New Jersy 土壤磷肥的 "Fertilizer equivalent"，將磷肥加入土壤後保溫 6 星期，所得結果爲使 Bray's p-1 測值提高 0.45 kg 需施磷 0.8 至 2.1 kg。

本試驗中磷聚積處理自開始至結束共歷時五個月，其有效磷測值應已趨穩定，所得結果與前述 Peck 及 Griffin 者也極接近。

（二）磷素回收率與土壤性質之關係：本試驗中所用12種土壤施用磷肥後之回收率相差很多，其中最低者爲東部之東河及長濱兩土壤（土號11及12），回收率僅 14%（Bray's p-1 法測值）；回收率最高之土壤爲彰化之新濁水系冲積土（土號4），達62%，兩者間相差幾達五倍，而土壤性質相差也很多。

經將土壤性質中可能影響磷回收率之 pH, O. M., CEC, Ex. Ca, Al, Free Fe, P sorption, Bray's p, Al-P, Fe-P, Ca-P, Clay 及 Clay+Silt 等十三項與磷回收率作迴歸分析，發現其中五項與磷回收率達顯著或極顯著之關係，其單相關係數如表 5。

表 5. 磷素回收率與土壤性質之相關關係

Table 5. Correlation coefficients for relationships between P recovery rate and soil characteristics

	O. M.	CEC	Ex. Ca	P sorption	Bray's p
P recovery rate	−0.684*	−0.780**	−0.727**	−0.677*	0.706*

* Significant at 5% level, **Significant at 1% level.

上表顯示 O. M., Ex. Ca 含量高，CEC 及 P Sorption 大的土壤施磷肥後被固定的機會較多；Bray 磷含量較高的土壤被固定的機會較低。其中除 CEC 一項外，均甚爲合理。粘土礦物中之高嶺石類較蒙特石類固磷較多[(6)]，但前者之 CEC 遠低於後者，此點似與本試驗結果矛盾，係因本試驗所用土壤無含蒙特石類粘土礦物之故。

又複迴歸分析結果，發現如以土壤 CEC, P sorption 及 Bray's p 三者估計磷回收率，其可靠性可達78%，如圖 1。

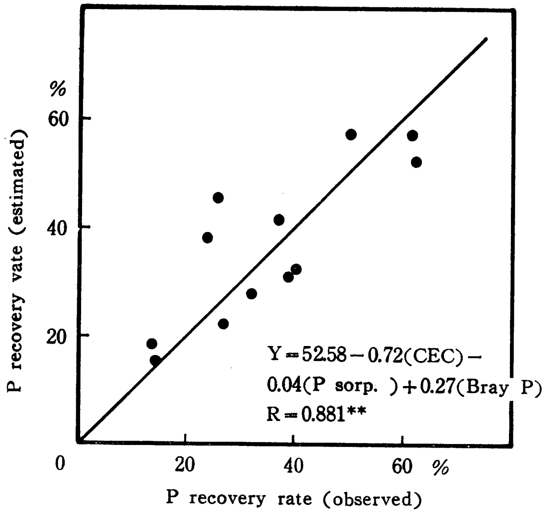

圖1. 以土壤 CEC, p sorption 及 Bray's p 估計之磷回收率與實測值之關係

Fig. 1. Relationship between P recovery rate estimated by soil CEC, P sorption as well as Bray's P and observed P recovery rate

三、作物磷吸收量與土壤有效磷測值及磷型態之關係：

本研究中曾以經磷聚積處理過的土壤及各土壤的對照處理進行 Neubauer 法磷效應試驗兩次。第一次爲71年5月10日播種，5月21日收割；第二次爲6月1日播種，6月17日收割，兩次各土壤均有三等級磷肥處理，但小麥收量在不同磷等級處理間無差異，因之無法找出累積施用磷肥後磷缺乏臨界值有無改變。

表6. 小麥磷吸收量及磷含量與土壤性質之關係 [a]

Table 6. Correlation coefficients for relationships between soil characteristics and P uptake by wheat

Soil factors	P % (in plant)	P uptake
pH	0.001	− 0.429
O. M.	− 0.191	0.030
CEC	− 0.246	− 0.163
Ex. Ca	− 0.201	− 0.304
Ex. Al	− 0.345	0.010
Free Fe	− 0.416	− 0.418
P sorption	0.115	− 0.053
Bray's P	0.503	0.499
Al-P	− 0.397	− 0.324
Fe-P	0.691**	0.941**
Ca-P	0.223	− 0.201
Clay	− 0.402	− 0.178
Clay+silt	− 0.295	0.026

* Significant at 5% level, **Significant at 1% level.

a. 本表中僅包括無磷聚積之土壤。

本報告中之作物產量及磷吸收量，磷含量資料均係以經磷聚積處理過的土壤（12種土壤× $\left\{\begin{matrix}P_0\\P\end{matrix}\right.$ 兩處理）而在種小麥前未再施磷的處理計算（兩次各四重複計八盆資料之平均）（表7）。

（一）土壤性質與作物磷吸收量及磷含量的關係：

作物磷吸收量與土壤性質應有密切關係。經將土壤性質中可能與磷吸收量有關之若干性質（其中 P sorption, Bray's p , Al-P, Fe-P 及 Ca-P 等均採用未施磷處理之資料）與磷吸收量（無磷聚積處理者）作單相關迴歸分析，結果列於表6。此表顯示土壤性質中僅 Fe-P 的含量與小麥磷吸收量及含量關係達顯著程度，與其他土壤性質關係均不顯著。

本試驗中所用土壤之磷型態（表3未施磷肥者）有 53.2%爲 Fe-P，故作物吸收者多爲 Fe-P，但 Ca-P 也佔 44.8%，而其與作物磷吸收量及含量之關係却遠遜於 Fe-P，應係由於 Ca-P 較 Fe-P 更不易被作物吸收之故。

（二）作物磷吸收量及含量與土壤有效磷測定方法之關係：

表7所列資料爲以不同有效磷測定法測出之原土壤及加磷處理過之土壤中有效磷含量及小麥磷含量，磷吸收量。表8爲其間之單相關關係（包括有與無磷聚積之土壤）。

表7. 原土壤與磷素聚積土壤中有效磷含量及作物磷吸收量

Table 7. Quantities of P extracted by different methods from samples with and without P accumulation treatment and P uptake by wheat

土 號 Soil No.	處 理 Treatment	Bray's P P ppm	Olsen's P P ppm	EUF-P (ug/5g Soil)			P% (in wheat)	P uptake by wheat (mg/pot)
				30min.	5min.	Total		
1	O	16	6	1.1	1.2	2.3	0.56	1.68
	P	220	156	76	91	167	0.81	4.81
2	O	32	21	39	26	65	0.64	2.88
	P	160	120	147	139	286	0.83	5.54
3	O	65	40	26	12	38	0.53	2.30
	P	370	352	185	274	459	0.87	8.70
4	O	29	13	52	10	62	0.50	0.93
	P	340	176	212	215	427	0.85	6.24
5	O	16	10	7	2	9	0.52	0.19
	P	150	183	122	42	164	0.72	3.90
6	O	8	3	0	0.5	0.5	0.48	0.17
	P	195	153	203	107	310	0.74	3.65
7	P	62	27	107	125	232	0.59	0.68
	O	310	256	453	430	883	0.87	4.70
8	O	11	4	36	4	40	0.50	0.16
	P	170	180	163	45	208	0.73	2.27
9	O	7	7	13	9	22	0.51	0.66
	P	125	68	88	84	172	0.72	3.40
10	O	17	5	1	0.6	1.6	0.45	0.54
	P	210	170	45	56	101	0.67	2.86
11	O	8	10	11	6	17	0.51	0.76
	P	77	130	83	60	143	0.73	5.10
12	O	7	7	3	3	6	0.49	0.75
	P	81	156	84	53	137	0.70	3.47
Average	O	18	13	25	17	41	0.52	0.98
	P	201	175	155	133	288	0.77	4.55

表8. 作物磷吸收量及磷含量與土壤有效磷測值及磷型態之相關關係

Table 8. Correlation coefficients for relationships between plant P uptake, P content in plant and soil available P as well as inorganic forms of soil P

	Olsen's P	EUF-P (30min)	EUF-P (5min)	EUF-P (Total)	Al-P	Fe-P	Ca-P	P%(in plant)	P uptake
Bray's P	0.919**	0.789**	0.832**	0.826**	0.922**	0.368	0.355	0.895**	0.858**
Olsen's P		0.715**	0.757**	0.769**	0.944**	0.495*	0.162	0.882**	0.866**
EUF-P (200V, 30 min.)			0.922**	0.980**	0.647**	0.284	0.454*	0.781**	0.621**
EUF-P (400V, 5min.)				0.980**	0.665**	0.255	0.450*	0.777**	0.700**
EUF-P (Total)					0.669**	0.275	0.461*	0.795**	0.674**
Al-P						0.537**	0.164	0.911**	0.883**
Fe-P							−0.117	0.630**	0.667**
Ca-P								0.289	0.216

*Significant at 5% level, **Significant at 1% level.

由表8知以 Bray, Olsen 及 EUF 三種方法抽出之磷與作物磷吸收量及含量之相關關係中，Bray 氏法與 Olsen 氏法極爲接近，而 EUF 法較低。以 EUF 法抽取之磷無論以 200 V，室溫30分鐘或 400 V, 80 °C 抽取5分鐘或兩者相加之量與植物磷吸收量之關係均遜於前二法者，雖其相關係數均已達1%顯著平準。

表8中相關分析資料係包括經加磷及未加磷處理之土壤。由作物磷吸收量與土壤 Bray 及 Olsen 磷的極顯著相關關係（圖2及3）知以此二法測得之土壤有效磷已可有效代表土壤中可被作物吸收利用之磷含量，無論此磷肥係過去或新近施用者。圖4及5爲小麥磷含量與 Bray 及 Olsen 磷之曲線相關關係，較直線關係更爲密切。

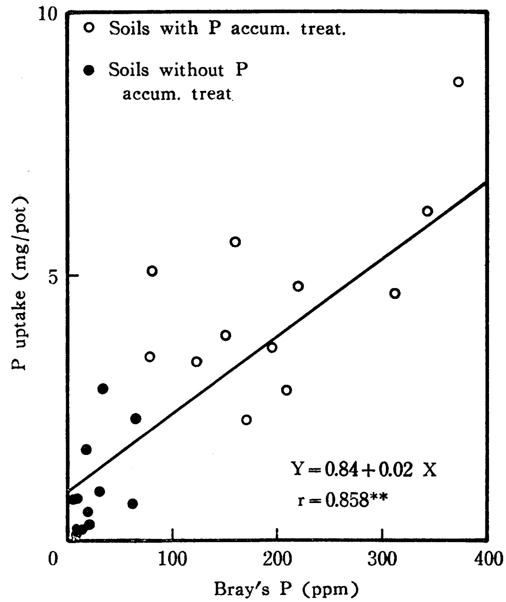

圖2. Bray 磷與作物磷吸收量的關係

Fig. 2. Relationship between Bray's P and P uptake by plant.

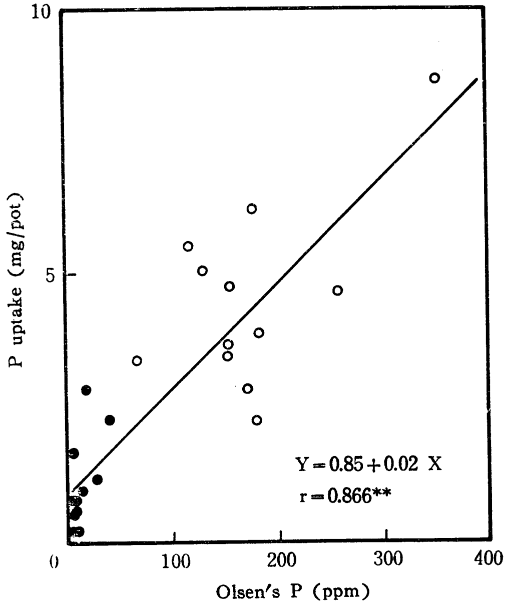

圖3. Olsen 磷與作物磷吸收量的關係

Fig. 3. Relationship between Olsen's P and P uptake by plant.

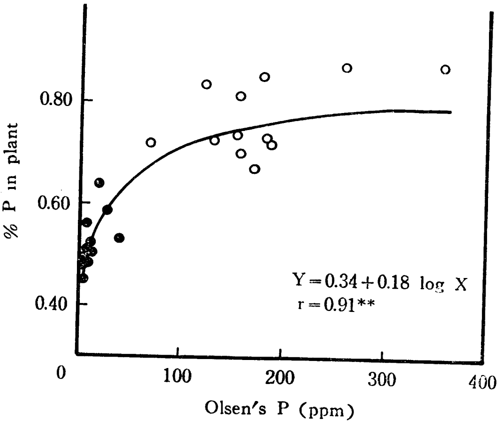

圖4. Olsen 磷與作物磷含量的關係
Fig. 4. Relationship between Olsen's P and P content in plant.

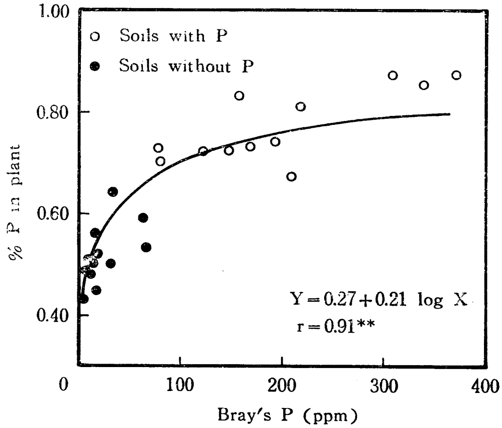

圖5. Bray 磷與作物磷含量的關係
Fig. 5. Relationship between Bray's P and P content in plant.

Yost[23] 也認為土壤中可抽取性磷（該研究中係以 0.05 N HCl+0.025 N H_2SO_4 抽取者）可有效代表土壤中過去或現在施用磷肥之有效度。但 Adepoju 及 Pratt[4] 等對已有多量磷肥殘留之土壤所作之研究資料則顯示可被作物吸收利用的磷無法全賴化學抽取法之測值決定，而必須同時考慮土壤性質。

（三）作物磷吸收量及含量與土壤中磷型態之關係：

表 8 顯示作物磷吸收量及含量與三型態磷中之 Al-P 關係最密切，Fe-P 居次，Ca-P 最差。表 6 之資料則顯示作物磷吸收量與 Fe-P 含量之關係最密切。足見在新近施用磷肥之土壤中，Al-P 之含量仍高，則作物吸收者以 Al-P 最多，Fe-P 居次。當 Al-P 在土壤中逐漸轉變為 Fe-P 及 Ca-P 後，作物吸收者即以 Fe-P 為主。

張氏[8] 在其早年對水稻所作之試驗中，發現水稻所吸收之磷係以 Fe-P 為主，其次為 Al-P。林氏[2] 以玉米所作的試驗中則發現在旱作情形下，玉米吸收的磷以 Al-P 為主，其次為 Fe-P。蔡氏[22] 以菸草所作之試驗，也認為菸草吸收的磷與土壤中的 Al-P 相關顯著，而與 Fe-P 及 Ca-P 則否。

又 Bray 氏及 Olsen 氏法抽取之磷也與 Al-P 之相關最高（相關係數依次為0.922**及0.944**）。此項結果與 Shelton 等[20] 所得結果也極相符。彼等發現以 0.05 N HCl+0.025 N H_2SO_4 抽取之土壤有效磷與 Al-P 有密切的關係。

參 考 文 獻

1. 臺灣省農業試驗所．1981．作物需肥診斷技術。
2. 林家棻、張愛華、曾肇清．1970．土壤中不同形態磷含量與作物對於磷肥效應之關係，中華農學會報告 69 期 P. 19.
3. 林家棻、李子純、王幼惠．1972．土壤樣本乾燥程度對於磷鉀有效指數的影響，農業研究21：233—249。
4. Adepoju, A. Y., P. F. Pratt, and S. V. Mattigod, 1972. Availabilitsy and extractability of phosphorus from soils having high residual phosphorus. SSSAJ. 46：583-588.
5. Asami, T., and Kumada, K. 1960. Comparison of several methods for determining free iron in soils. Soil & Plant Food 5：179-183.
6. Bear, F. E. 1961. Chemistry of the soil. 2nd Ed. Reinhold Publishing Crop, New York.
7. Black, C. A., 1965. Methods of soil analysis, Part 2. pp. 985-990.

8. Chang, S. C., 1966. Application of phosphorus fractionation to the study of the chemistry of available soil phosphorus. Soils and fertilizers in Taiwan, 1965 Issue, p. 1.

9. Cooke, G. W., 1971. Value & valuation of fertilizer residues in Proceedinrgs of a conference entitled "Residual value of applied nutrients". Technical Bulletin No. 20, Ministry of Agriculture, Fisheries and Food. Her Majesty's Stationery Office, London.

10. Engelstad, O. P., W. L. Parks, 1976. Buildup of P and K in soils and effective use of these reserves. TVA fertillizer conference proceedings. 1976. TVA Bulletin Y-106, Muscle Shoals, Alabama, U. S. A.

11. Engelstad, O. P., 1979. Assessing P & K reserves in soils. TVA fertilizer conference proceedings.

12. Eik, K., J. R. Webb, C. A. Black, C. M. Smith, and J. T. Pesek. 1961. Evaluation of residual effects of phosphorus fertilization by laboratory and plant-response methods. SSSAP 25 : 21-24.

13. Ensminger, L. E., 1960. Residual value of phosphorus. Bulletin 322, Agri. Experiment Station, Auburn Univ., Auburn, Alabama, U. S. A.

14. Fox, R. L., and E. J. Kamprath, 1970. Phosphate sorption isotherms for evaluating the phosphate requirements of soils. SSSAP 34(6) : 902-907.

15. Griffin, G. F., and W. J. Hanna, 1967. Phosphorus fixation and profitable fertilization : 1. Fixation in New Jersey soils. Soil Sci. 103 : 202-208.

16. Ibrahim, H. S., and P. F. Pratt. 1982. Effects of rate of application and time on phosphorus sorption by soils. SSSAJ, 46 : 926-928.

17. Nemeth, K. 1979. The availability of nutrients in the soil as determined by electro-ultra-filtration (EUF). Advances in Agronomy, 31 : 155-188.

18. Peck, T. R., L. T. Kurtz, and H. L. S. Tandon, 1971. Changes in Bray P-1 soil phosphorus test values resulting from applications of P fertilizer. SSSAJ 35 : 595-599.

19. Peterson, G. W., and R. B. Corey. 1966. A modified Chang & Jackson procedure for routine fractionation of inorganic soil phosphates. SSSAP 30 : 563-565.

20. Shelton, J. F., and N. T. Coleman. 1968. Inorganic phosphorus fractions and their relationship to residual value of large applications of phosphorus on high phosphorus fixing soils. SSSAP 32 : 91-94.

21. Tisdale, S. L., and W. L. Nelson. 1966. Soil fertility and fertilizers. 2nd Ed. The Macmillan Company, N. Y., U. S. A.

22. Tsai, C. F., Ling, K. C., et al. 1966. Correlation between soil phosphorus content and response of tobacco to phosphorus fertilizer. Annual report of Taiwan Tobacco Res. Inst.

23. Yost, R. S., E. J. Kamprath, G. C. Naderman, and E. Lobato. 1981. Residual effects of phosphorus applications on a high phosphorus adsorbing oxisol of Central Brazil. SSSAJ. 45 : 540-543.

The Accumulation, Transformation, and Utilization of Phosphorus Fertilizer Applied in Different Soils[1] under Upland Condition

Lee Tze-Shun[2]

Summary

Phosphorus was incorporated into 12 different soils in 4 successive applications at 30 days interval in the greenhouse. After each addition, the soils were submerged for 10 days, than left until dry to simulate field conditions. A total of 500 ppm P was applied while a check treatment (no P was added) was included for each soil. After this pre-treatment, the soils were used for Neubauer's P test; the plants grown were wheat. Soil chemical properties were analyzed and available P was extracted by Bray's, Olsen's, and EUF methods. Distribution of inorganic P fractions were determined for both the P-treated and check soils. This study was conducted to compare the distribution of inorganic P fractions in the original soil and P-enriched soil, the extractability and availability of P applied in soil as well as the P recovery rate of these soils.

The results are summarized as follows.

1. P fractionation data show that in the original soil, the inorganic P forms are dominantly Fe-P (53.2%) and Ca-P (44.8%), and only 1.9% is Al-P (the average of 12 soils), whereas in the P-fertilized soil, 84% of the inorganic P fractions are Al-P and Fe-P, with a ratio of about 1 : 1, and Ca-P becomes the minor part.

2. The P recovery rate (as determined by Bray's P-1 method) of the 12 soils varies greatly from 13.8 to 62.2%, with an average of 35.5%. regression study shows that P recovery rate is negatively correlated with soil CEC, P sorption, and O. M. content, but positively correlated with soil available P. When P recovery rate is estimated by soil CEC, P sorption and Bray's P together (the multiple corrlation coefficient R=0.881**), its accuracy is 78%.

3. Quantities of soil P extracted by Bray's, Olsen's, and EUF methods are significantly correlated with plant P uptake, while the Bray's and Olsen's methods producing the higher correlation coefficients (0.858** and 0.866** respectively). This significant correlation signifies that soil available P as extracted by Bray's or Olsen's method can effectively represent the amount of P in soil that can be utilized by plants, no matter it is newly applied or not.

---

1. Contribution No. 1094 from the Taiwan Agricultural Research Institute.

2. Soil Chemist, Department of Agricultural Chemistry, TARI, Wufeng, Taichung Hsien, Taiwan, 431, ROC.